

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420334

研究課題名(和文) 小型アンテナ一体型エネルギーハーベスティングシステムの開発

研究課題名(英文) Energy Harvesting Circuit on a Miniaturized One-sided Directional Antenna

研究代表者

金谷 晴一 (Kanaya, Haruichi)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・准教授)

研究者番号：40271077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：放送や通信に用いられる電磁波に対して、高効率の昇圧特性を持つ昇圧整流回路を提案し、フレキシブルアンテナと一体化することで、アンテナ一体型エネルギーハーベスティングシステムを開発した。昇圧回路にはコッククロフト・ウォルトン回路を用い、インピーダンス整合回路、直列共振回路を一体化した。また、アンテナには独自開発した単方向平面アンテナを用い、フレキシブル基板上に実現した。本回路を用いて900MHzの受信信号(信号強度0.4mW)に対し、LEDの発光を確認でき、電磁波によるエネルギーハーベスティングが実現できた。

研究成果の概要(英文)：In this project, RF-to-DC energy harvesting circuit was developed. The circuit was composed of a one-sided directional flexible antenna, an impedance matching circuit, a resonant circuit, and a booster circuit for converting and boosting radio frequency power into DC voltage. The booster circuit was based on traditional Cockcroft-Walton circuit. One-sided directional flexible antenna is composed of slot antenna, interdigital gap and coplanar wave guide. Power conversion efficiency at -10 dBm input @ 900 MHz is optimized by the load resistance. Simulated conversion efficiency is 58.7%. Because of the effect of the parasitic components in the circuit, measured efficiency was 44%. By implementing this circuit on CMOS, effect of the parasitic components will be reduced.

研究分野：電子回路

キーワード：エネルギーハーベスト 昇圧回路 単方向アンテナ フレキシブルアンテナ

1. 研究開始当初の背景

エネルギーハーベスティングは別名「環境発電」と呼ばれ、光、熱、振動、電磁波等の各種エネルギーを収穫し、変換器で電気エネルギーに変換する発電技術である。これまでの電磁波を利用した給電技術では発電量が数 μW にとどまっていたため、RFID やセンサにその技術が応用されるのみであった。実際、放送や無線信号などで使われている電力密度の低い電磁波であるマイクロ波では、UHF 帯を用いたアクティブ動作型 RFID タグ (東北大 2004, Bloadcom 2007 等) で数 μW の電力しか供給できておらず、送電距離も数 m と短いものであった。テレビ電波塔から放射される放送用 UHF 帯を利用したセンサ駆動システム (Intel 2009) は数 km の長距離送電が可能であるが、大型の TV 用室内アンテナを用いたとしても、得られる電力は数 $10\ \mu\text{W}$ 程度である。

2. 研究の目的

本研究では、微弱な電磁波に対して、高効率の昇圧特性を持つ昇圧整流回路を、マイクロ波を活用した小型アンテナ一体型エネルギーハーベスティングシステムに適用することを目的とする。このシステムは、発電量、送電距離ともにこれまで未開拓であった領域を切り開く新しい技術であり、さらに通信機器や家電製品への電力供給と通信が同時に可能となる。

3. 研究の方法

小型アンテナ一体型エネルギーハーベスティングシステムを開発するために、小型指向性アンテナ、インピーダンス整合回路、T 型共振フィルタ、昇圧回路一体型整流回路の開発を行い、各回路の接続部を整合し一体化する。アンテナ設計においては、利得および指向性を向上させ、試作・評価を行う。回路設計においては、提案回路の回路設計および検証と、回路素子の三次元実装・評価を行う。最終的にすべての回路を一体化する。

4. 研究成果

図 1 に本研究で提案する昇圧回路一体型整流回路である。昇圧回路にはコッククロフト・ウォルトン回路 [1] を用い、インピーダンス整合回路、直列共振回路、及びインピーダンス整合回路を一体化した。

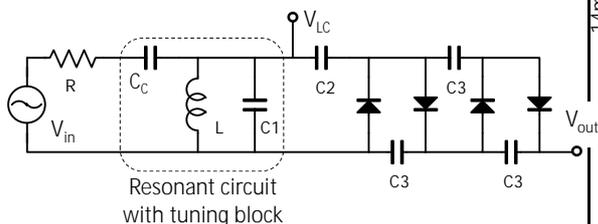


図 1. 昇圧回路一体型整流回路

図 2 は、900MHz における入力電圧に対する、共振回路出力電圧 (V_{LC})、および昇圧回路の出力電圧 (V_{out}) の時間軸解析結果を示す。図に示すとおり、共振回路により、高周波領域における微弱電圧の電圧振幅を増大し、その後昇圧が可能となった。なお、回路素子は、チップキャパシタ・チップインダクタ、及びダイオード (HSMS-286Y, Avago) を用いた。

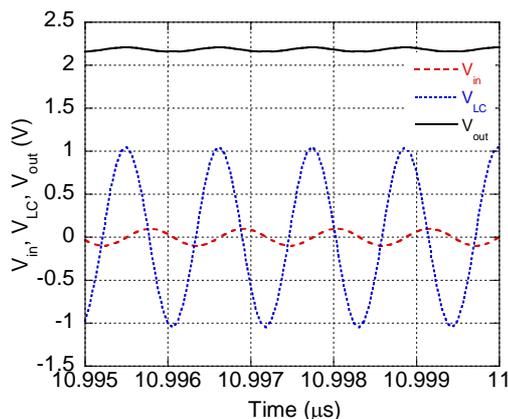


図 2. 昇圧回路一体型整流回路の出力電圧

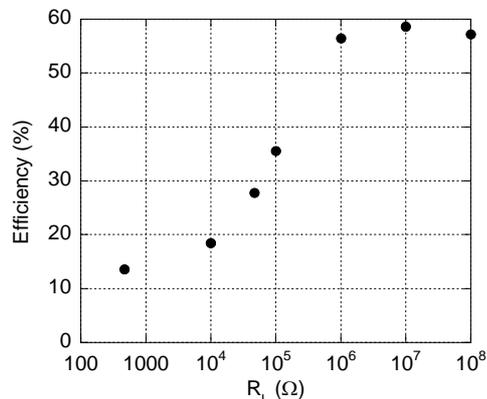


図 3. 負荷抵抗における電力効率

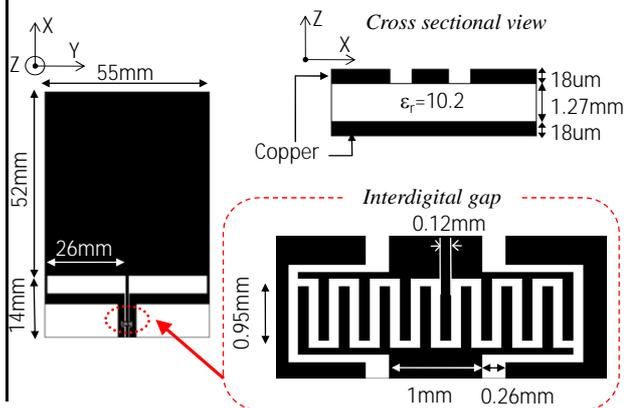


図 4. アンテナレイアウト

図 3 は出力端に負荷抵抗 (R_L) を接続した場合の、 R_L に対する電力効率である。 $10 \times 10^6 \Omega$ 以上であれば、最大効率 58.7% が得られた。

図 4 は、一体化するアンテナのレイアウト

である。基板には、フレキシビリティのある Rogers 社の基板 ($\epsilon_r = 10.2$ and $\tan\delta = 0.0023$) を用いた。基板サイズは $55\text{ mm} \times 66\text{ mm}$ である。アンテナを小型化するために、インターデジタルギャップをアンテナの入力端に挿入し、インピーダンス整合を行った。また、裏面にフローティングメタルを配置し、アンテナ上面のメタル長を最適化することにより、単方向化を行った。

図 5 は試作したアンテナの写真である。アンテナを湾曲することが可能である。特性インピーダンス $50\ \Omega$ のコネクタ (MMCX type) を接続した。

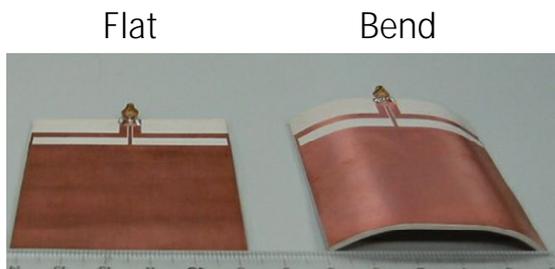


図 5. アンテナの写真

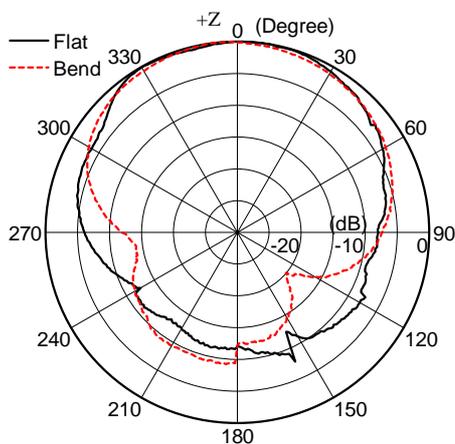


図 6. アンテナの放射パターンの実測値 (平面、湾曲)

図 6. は放射パターンの実測値である。湾曲した場合でも、良好の利得、及び指向性を有するアンテナが実現できた。

図 7. は試作した昇圧回路一体型整流回路である。図 8. は V_{out} の周波数依存性である。設計値においては、寄生素子の影響を考慮していないため、 900MHz にて、急峻なピークが見られた。実測値において、伝送線路の高周波特性、及び寄生素子が現れるため、中心周波数が低周波側 (800MHz) にシフトし、 Q 値の低下により、効率が 44% に低下した。しかしながら、伝送線路、及び寄生素子をモデル化し、再シミュレーションを行ったところ、図に示すとおり、実測値とほぼ同等の値が得られ、提案する昇圧回路一体型整流回路の妥当性が示された。よって、放送や通信などで放射されたマイクロ波 (900MHz 帯) を回収し、

直流電源へと変換する小型アンテナ一体型エネルギーハーベスティングシステムが開発できた。

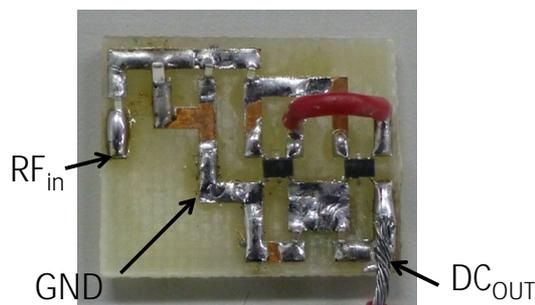


図 7. 昇圧回路一体型整流回路の写真

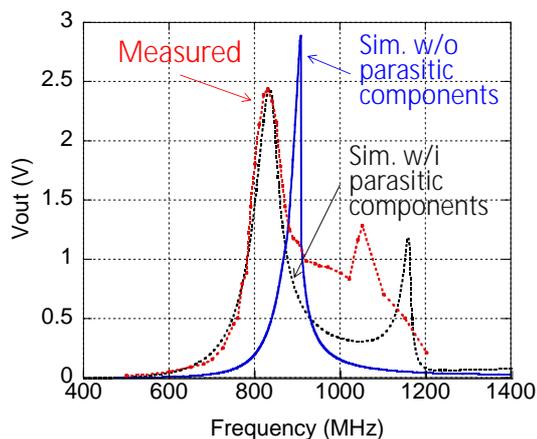


図 8. 昇圧回路一体型整流回路の実測値

<引用文献>

[1] Cockcroft-Walton generator, http://en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft-Walton_generator

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 32 件)

1. Yuki Yamashita, Daisuke Kanemoto, Haruichi Kanaya, Ramesh K. Pokharel, Keiji Yoshida, A self-biasing class-E power amplifier for 5-GHz constant envelope modulation system, IEICE Electronics Express, Vol. 10, No. 8, pp.1-7, April 25, 2013.
2. Haruichi Kanaya, Daisuke Kanemoto, Kazuhiro Hayakawa, Keiji Yoshida, Ramesh K. Pokharel, Kuniaki Yoshitomi, Akira Ishikawa, Shugo Fukagawa, Noriyuki Kodama, Akihiro Tahira, Multi-Band Miniaturized Slot Antenna with Two-Stage Bandpass Filte, Proc. 2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, pp.930-931, July 10,

- 2013.
3. Guoqiang Zhang, Abhay Kochhar, Keiji Yoshida, Shuji Tanaka, Kenya Hashimoto, Masayoshi Esashi, Haruichi Kanaya, Ramesh K. Pokharel, A low phase noise FBAR based multiband VCO design, IEICE Electronics Express Vol. 10, No. 13, pp.1-6, July 10, 2013.
 4. S. Tsukamoto, N. Iizasa, K. Yoshitomi, R. Pokharel, D. Kanemoto, K. Yoshida, R. Hattori, and H. Kanaya, Development of a Rectenna for Batteryless Electronic Paper, Proc. International technical conference of IEEE Region 10 (TENCON) 2013, USB pp.1-4, 2014.
 5. K. Miyahara, D. Kanemoto, R. K. Pokharel, K. Yoshida and H. Kanaya, Development of Dual Band Digitally Controlled Oscillator using Fibonacci Sequence in 0.18 μm CMOS Process, Proc. International technical conference of IEEE Region 10 (TENCON) 2013, USB pp.1-4, 2014.
 6. Y. Shinki, D. Kanemoto, K. Yoshida, R. K. Pokharel, K. Yoshitomi, and H. Kanaya, Wireless Power Transmission Circuit on a Small Planar Wide-Band Antenna Proc. International technical conference of IEEE Region 10 (TENCON) 2013, USB pp.1-4, 2014.
 7. Toru Okazaki, Daisuke Kanemoto, Ramesh Pokharel, Keiji Yoshida, Haruichi Kanaya, A Design Technique for a High-speed SAR ADC Using Non-binary Search Algorithm and Redundancy, 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, pp.506-509, 2013.
 8. Tomoya Ijiguchi, Daisuke Kanemoto, Kuniaki Yoshitomi, Keiji Yoshida, Akira Ishiawa, Shugo Fukagawa, Noriyuki Kodama, Akihiro Tahira, Haruichi Kanaya, "Development of Circularly Polarized Planar Slot Antenna for 5.8 GHz-DSRC Application, 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, pp.1079-1081, 2013.
 9. (Invited) R. Hattori, K. Miyamoto, H. Kanaya, S. Tsukamoto, H. Ishinishi, Wireless Power Transmitting System for Mobile Devices, Proc. International Display Workshops 2013, CD-ROM, FMC7-2, pp.1-4, 2013.
 10. K. Fujita, D. Kanemoto, K. Yoshitomi, K. Yoshida, H. Kanaya, UWB Circularly Polarized Planar Antenna on Flexible Substrate, Proc. IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications 2013, USB-TP17, pp.1-3, 2013.
 11. Daisuke Kanemoto, Keigo Oshiro, Keiji Yoshida, Ramesh Pokharel, and Haruichi Kanaya, A 10-bit 50MS/s 350 μW Small Die Area Capacitive Digital-to-Analog Converter for Bluetooth Applications, IEIJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.134 No.2 pp.328-329, 2014, DOI: 10.1541/ieejieiss.134.328.
 12. Tomoya Ijiguchi, Daisuke Kanemoto, Kuniaki Yoshitomi, Keiji Yoshida, Akira Ishikawa, Shugo Fukagawa, Noriyuki Kodama, Akihiro Tahira, and Haruichi Kanaya, Circularly Polarized One-Sided Directional Slot Antenna With Reflector Metal for 5.8-GHz DSRC Operations, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 13, pp.778-781, April, 2014, DOI: 10.1109/LAWP.2014.2314962.
 13. Toru Okazaki, Daisuke Kanemoto, Ramesh Pokharel, Keiji Yoshida, Haruichi Kanaya, A design methodology for SAR ADC optimal redundancy bit, IEICE Electronics Express Vol. 11 (2014) No. 10 pp. 1-6, DOI:10.1587/elex.11.20140218.
 14. W. Yamamoto, D. Kanemoto, R. Pokharel, K. Yoshida and H. Kanaya, A Low Power 2.4GHz LNA Operated in Subthreshold Region, Future Information Engineering Volume I, WIT Transactions on Communications and Information Technologies, Volume 49, pp.199-296, May, 2014.
 15. H. Kanaya, K. Fujita, T. Ijiguchi, K. Yoshida, K. Yoshitomi, A. Ishikawa, S. Fukagawa, N. Kodama, A. Tahira, Compact Size UWB Planer Antenna on Flexible Substrate, Proc. 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting, pp.201-202, July, 2014.
 16. (Invited) H. Kanaya, Multi-Band Miniaturized Slot Antenna with Multi-Band Impedance Matching Circuit, Proc. Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation 2014, pp. 551-554, 2014.
 17. N. Iizasa, K. Yoshitomi, R. Pokharel, H. Kanaya, High Gain 4×4 Slot Dipole Antenna Array in the 5GHz Band, Proc. Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation 2014, pp. 197-200, 2014.
 18. S. Nakamura, D. Kanemoto, R. K. Pokharel, K. Yoshida, and H. Kanaya, High Efficient Impedance Matching Circuit of Power Amplifier Combined with Antenna, Proc. IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile 2014, pp.84-87, 2014.
 19. K. I. Yousef, H. Jia, R. Pokharel, A.

- Allam, M. Ragab, H. Kanaya, A 0.18 CMOS Current Reuse Ultra-Wideband Low Noise Amplifier (UWB-LNA) with Minimized Group Delay Variations, Proc. 44th European Microwave Conference pp. 1392-1395, 2014.
20. (Invited) Haruichi Kanaya, 800MHz/2GHz Up/Down Link Miniaturized Slot Antenna with Multi-Band Impedance Matching Circuit, Proc. 10th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory, pp.25-29, 2014.
21. Koji Fujita, Daisuke Kanemoto, Kuniaki Yoshitomi, Keiji Yoshida, and Haruichi Kanaya, Multiband (920 MHz/2.4 GHz/3.5 GHz/5 GHz) Planar Antenna on Flexible Substrate, Microwave and Optical Technology Letters, Vol 56, Issue 11, pp. 2526-2530, 2014. DOI 10.1002/mop.
22. N. Iizasa, K. Yoshitomi, R. Pokharel, H. Kanaya, 2 x 2 Slot Dipole Array Antenna with CPW for 2.4GHz Band, Proc. International Symposium on Antennas and Propagation, 603-604, 2014.
23. H. Kanaya, N. Iizasa, and T. Oda, One-Sided Directional Slot Antenna with Impedance Matching Circuit for 3D Packaging, Proc. of the 16th Electronics Packaging Technology Conference, pp.734-737, 2014.
24. (招待論文) 金谷 晴一, Wi-Fi や WiMAX ,5GHz 帯無線 LAN への活用が期待、フレキシブル基板を用いたウルトラワイドバンド平面アンテナの開発、電磁環境工学情報誌 月刊 EMC 2015 年 2 月号 (No.322), pp.78-85, 2015.2.5
25. Ran Song, Haruichi Kanaya, Hongting Jia, A Double-Sided Printed Compact UWB Antenna, Proc. 3rd International Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers, pp.18-19, 2015, 3.
26. Sherif Hekal, Adel Abdel-Rahman, Hongting Jia, Ahmed Allam, Ramesh Pokharel, and Haruichi Kanaya, Strong resonant coupling for short-range wireless power transfer applications using defected ground structures, Proc. IEEE Wireless Power Transfer Conference pp.usb1-usb4, 2015, 5.
27. T. Oda, N. Iizasa, G. C. Eu, K. Yoshitomi, and H. Kanaya, Circularly Polarized One-sided directional Slot Array Antenna for 920MHz Application, Proc. 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, pp. 92-93, 2015.
28. (Invited) H. Kanaya, 5 GHz-band CMOS Class-E Power Amplifier Module Considering Wire Bonding, Proc. 2015 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, pp.157-159, Aug. 2015.
29. K. Fujita, K. Yoshitomi, K. Yoshida, H. Kanaya, A circularly polarized planar antenna on flexible substrate for ultra-wideband high-band applications, International Journal of Electronics and Communications AEU, Vol. 69, Issue 9, pp. 1381-1386, 2015.
30. H. Kanaya, T. Oda, N. Iizasa, and K. Kato, 300 GHz One-Sided Directional Slot Array Antenna on Indium Phosphide Substrate, Proc. 2015 International Symposium on Antennas and Propagation, pp.24-25, 2015.
31. Kyohei Eto, Kizuku Takemoto, Haruichi Kanaya, Development of Highly Efficient 5GHz-band CMOS Class-E Power Amplifier Module, Proc. of the 16th Electronics Packaging Technology Conference, pp.1-3, 2015.
32. Haruichi Kanaya, Tomoki Oda, Naoto Iizasa, Kazutoshi Kato, Planar array antenna with director on indium phosphide substrate for 300GHz wireless link, Proc. SPIE Photonics West 2016, Vol. 9747, pp. 974722-1-74722-6, doi:10.1117/12.2205421.
- [学会発表](計 32 件)
- 1: 第 23 回 マイクロエレクトロニクスシンポジウム秋季大会(MES2013), 2013/9/12-13, 大阪大学吹田キャンパス, 5GHz 帯高効率 PA のモジュール化に向けた協調解析および実証実験, 内田祐介, 宮川晃尚, 金谷晴一
- 2: 第 2 回バイオメカニクス研究会&エレクトロニクス実装学会九州支部合同研究会, 2014 年 2 月 3-4 日, 九州大学, 5.2GHz 帯パワーアンプのモジュール開発, 宮川晃尚, 内田祐介, 衛藤恭平, 金谷晴一,
- 3: 第 2 回バイオメカニクス研究会&エレクトロニクス実装学会九州支部合同研究会, 2014 年 2 月 3-4 日, 九州大学, バッテリーレス電子ペーパー用レクテナの設計, 塚本祥一朗, 飯笹 直人, 吉富 邦明, 服部 励治, 吉田 啓二, 金谷晴一, 第 2 回バイオメカニクス研究会&エレクトロニクス実装学会九州支部合同研究会アブストラクト, o17, 2014.
- 4: 2014 年電子情報通信学会総合大会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 2014/3/18 ~ 21, 5GHz 帯高利得スロットダイポール 4x4 アレイアンテナの設計, 飯笹直人, 吉富邦明, 吉田啓二, 金谷晴一
- 5: ワイヤレスジャパン・ワイアレステクノロジーパーク 2014, 東京ビックサイト, 2014/05/28-29, 超小型アンテナ搭載無線通信用 RF フロントエンド LSI の開発, 金谷

- 晴一
- 6: (招待講演) 応用物理学会 第8回集積化MEMS技術研究会, 熊本大学, 2014/05/29-30, MEMS技術融合によるRF-CMOS front-end, 金谷晴一, ダヤングマト, ポカレルラメシュ, 石田 竜也, 吉田 啓二
 7. 第67回 平成26年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 鹿児島大学, 2014.9.18-19, A high linearity and current reused UWB low noise amplifier (LNA) for 3.1 -10.6 GHz wireless applications in 0.18 μm CMOS process, Fahmy Ghazal, 金谷晴一
 8. 第67回 平成26年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 鹿児島大学, 2014.9.18-19, 5GHz帯高効率E級パワーアンプモジュールの開発, 衛藤恭平, 宮川晃尚, 内田祐介, 金谷晴一
 9. 第67回 平成26年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 鹿児島大学, 2014.9.18-19, 920MHz帯円偏波スロットアレイアンテナの開発, 織田知樹, 吉富邦明, 金谷晴一
 10. 電子情報通信学会 2015年総合大会, 2015年3月10-13, 滋賀県・立命館大学, 920MHz帯円偏波スロットアレイアンテナの開発, 織田知樹, 飯笹直人, 吉富邦明, 金谷晴一
 11. 第29回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 東京都文京区 東京大学・本郷キャンパス, 2015年3月16-18日, ボンディングワイヤを考慮した5GHz帯高効率E級PAモジュールの開発, 衛藤恭平, 岳本城, 金谷晴一
 12. JPCA Show 2015, 2015/06/03-05, 東京ビッグサイト, RFフロントエンドの開発、及び九州大学日本エジプト科学技術連携センターの紹介, 金谷晴一
 13. 第6回集積化MEMS技術研究ワークショップ, 2015/07/31, 東京都世田谷区NHK放送技術研究所, 300GHz帯平面アレイアンテナの開発, 金谷晴一, 織田 知樹, 飯笹 直人, 加藤 和利
 14. 平成27年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2015/09/26-27, 福岡大学, 福岡市, Design of A Low Profile Waveguide Transmission Line With Reduced Radiation Loss, Chai Eu Guan, Kuniaki Yoshitomi, Haruichi Kanaya
 15. 平成27年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2015/09/26-27, 福岡大学, 広帯域な入出力インピーダンス整合によるホワイトスペース対応CMOS LNAの開発, 宮本凌哉, 岳本 城, 金谷晴一
 16. 平成27年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2015/09/26-27, 福岡大学, アンテナ一体型高効率エネルギー・ハーベスター, 新木優春, 柴田恭平, 金谷晴一
 17. SEMICON Japan 2015, 2015.12.16-18, 東

- 京ビッグサイト, 研究紹介, 金谷晴一
18. 2016年 電子情報通信学会総合大会, 2016/3/15-18, 九州大学, Xバンド小型高利得スロットダイポールアレイアンテナの開発, 古賀柁洋, 吉富邦明, 金谷晴一
 19. 2016年 電子情報通信学会総合大会, 2016/3/15-18, 九州大学, High-band UWBチップアンテナのアレイ化, 岩井郁也, 吉富邦明, 金谷晴一
 20. 2016年 電子情報通信学会総合大会, 2016/3/15-18, 九州大学, インプラントセンサ用2.4GHzモノポールフィルムアンテナの開発, 山口恭平, 吉富邦明, 松下恭之, 金谷晴一
 21. (招待講演)(チュートリアル講演) 電子情報通信学会総合大会, 2016/3/15-18, 九州大学, 電磁界シミュレータによる無線通信用集積回路およびアンテナの設計, 金谷晴一
 22. 2016年 第63回応用物理学会春季学術講演会, 東工大, 2016.3.19-22, トランジスタを用いた二乗検波器の感度特性, 関口 恭介, 松永 直也, 金谷晴一, 浅野 種正
 23. 第30回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2016/3/22-24, 東京工業大学, TV放送帯ホワイトスペース用広帯域CMOSLNAの開発, 宮本凌哉, 岳本 城, 金谷晴一
 24. 第30回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2016/3/22-24, 東京工業大学, アンテナ統合型エネルギーハーベスター, 新木優春, 柴田恭兵, 金谷晴一

出願状況(計2件)

名称: 片面放射デュアルバンドスロットアレイアンテナ

発明者: 金谷晴一、飯笹直人

権利者: 金谷晴一

種類: 特許

番号: 特願 2014-89605

出願年月日: 2014年4月7日

国内外の別: 国内

名称: 円偏波スロットアレイアンテナ

発明者: 金谷晴一、織田智樹

権利者: 金谷晴一

種類: 特許

番号: 特願 2015-103212

出願年月日: 2015年4月28日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金谷 晴一 (KANAYA HARUICHI)

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号: 40271077